第46卷 第2期
2023年2月

干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

Vol. 46 No. 2
Feb. 2023

2019年8月阿克苏罕见翻山大风精细特征及成因分析

肉孜·阿基， 于碧馨， 李如琦

（新疆气象台，新疆 乌鲁木齐 830002）

摘 要：南疆中西部的阿克苏地区，由于地理位置及地形的原因，在地面冷空气很强的时候，很容易就会出现翻山大风。为深入了解阿克苏翻山大风的机理，提高此类灾害性大风的预报能力，针对2019年8月15—18日出现的一次罕见翻山大风天气过程，利用常规气象观测资料、探空观测资料、模式预报资料、NCEP逐6 h格距1°×1°的再分析资料和阿克苏站、托万克提根洪沟站2个地面自动气象站的逐小时风向风速资料，对本次大风的精细特征及其影响系统和动力、热力条件进行了分析。结果表明：(1) 此次大风是在东欧阻塞高压发展加强、中亚低涡长时间维持并3次分裂东移的形势下，由高空急流和低层冷平流的共同作用使冷空气的势能向动能转化而引发的持续性大风。(2) 过程中出现了3次大风波动，均是高空槽引导冷空气翻越天山而形成，前2次是短波槽引起，大风持续时间短，第3次是主槽东移引发，大风持续时间长。(3) 第一次大风波动中有对流性雷暴大风叠加，瞬间阵风达12级。(4) 高空急流引起的强垂直运动和次级环流、中层辐合及低层辐散有利于大风的加强和维持。

关 键 词：翻山大风；雷暴大风；动力条件；热力条件；阿克苏

文章编号：1000－6060(2023)02－0222－11(0222～0232)

大风是在大尺度环流天气系统或局地强对流天气系统条件与特殊地形(峡谷、山谷、河谷)共同作用产生的一种灾害性天气，具有很强的破坏力[1-5]。气象上将2 min平均风速达到10.8 m·s^{-1}或瞬间风速达到17.2 m·s^{-1}的风造成的灾害称之为大风灾害[6]。大风灾害是全球造成死亡人数仅次于地震灾害的第二大灾害，约占所有自然灾害造成死亡人数的45%[7]。新疆由于特殊的地理位置和地形作用而盛行大风，因大风日数多、风力强、持续时间长，对工农业生产和人民生活影响大而广受关注[8]，近40 a来新疆风灾灾损呈波动性上升趋势，尤其是1998年以后风灾损失呈偏重发生[9]。

近年来，对大风的研究有许多成果，孙玉莲等[10]研究中高空急流是大风的动量来源；程月星等[11]认为探空曲线中低层接近于干绝热的环境温度直减率和下沉对流有效位能突增等现象，对预报大风天气有较好的指示意义；马鸿青等[12]认为强温度直减率、较强的低空垂直风切变、低层丰富能量的聚集是雷暴大风爆发的前提条件，地面冷锋、干侵入和地面中尺度辐合线为触发机制；潘新民等[13]研究了新疆百里风区地形对大风的影响，指出虽然造成大风的根本原因是冷空气活动，但特殊的地形影响使风速增幅；肉孜·阿基等[14-15]对乌鲁木齐东南大风典型个例进行了分析，表明大尺度环流配置、冷平流的输送以及动量下传是大风产生的重要物理因素。

地形对大气运动有显著影响，气流过山是一个非常经典的问题，国外于19世纪40年代就开始了过山气流的动力学理论方面的研究。Scorer[16]使用二层模式讨论背风波，提出了Scorer系数；Klemp等[17]用二维线性流体静力模式解释了美国科罗拉多博尔多地区的强下坡风暴，指出由于背风波的破碎而出现的湍流混合使得来自低层的重力内波在波破碎区产生反射进而导致下坡风暴的形成；Lilly[18]提出了大振幅背风波及重力波破碎与下坡风暴的关

收稿日期：2022-04-13； **修订日期**：2022-07-04
基金项目：中国气象局预报员专项(CMAYBY2020-151)；国家重点研发计划项目(2019YFC151050102)资助
作者简介：肉孜·阿基(1979-)，男，副高级工程师，主要从事中短期天气预报等方面的研究. E-mail: aji4201@126.com
通讯作者：李如琦(1974-)，男，正高级工程师，主要从事天气预报和灾害性天气机理等方面的研究. E-mail: liruqi@sohu.com

系；在理论研究的基础上，Doyle等[19]模拟了强下坡风的结构及特征，并于次年利用观测结果表述了强下坡风的结构与大振幅重力波的关系[20]。

国内，叶笃正[21]研究了小尺度地形对过山气流的影响；桑建国[22]求解了大气波动方程，得出了下坡运动的普适分析解；臧增亮等[23]利用三层理想模式对山坡背风侧的气流进行模拟分析后，给出了背风波的理论波长及扰动的分析解；卢冰等[24]利用WRF模式对克拉玛依下坡风暴进行模拟后提出，当上游风速不断增大时，气流能够翻山在背风坡侧形成重力波，重力波相位向气流上游方向倾斜产生非线性效应，促进了波不稳定区域的形成并导致波破碎，形成湍流活跃层，不断把上层的能量向下传播；汤浩等[25]利用WRF模式模拟天山峡谷穿谷急流后指出，在天山两侧强气压梯度作用下，气流爬坡进入天山峡谷过程中受地形强迫形成重力波，并在背风坡的断崖式突降地形区产生背风波，最终形成下坡风暴；张俊兰等[26-27]认为中低层较深厚的强冷平流输送、盆地热低压发展是天山翻山大风形成的热力因子。

阿克苏地区地处新疆维吾尔自治区南疆中西部，天山山脉西段南麓、塔里木盆地北缘，地势西北高东南低，平均海拔高度为960 m，阿克苏市城区海拔高度为1109 m，海拔7435.3 m的托木尔峰是境内的最高点，海拔945~1020 m的塔里木河两岸则是境内最低处。入侵的地面冷空气很强时，容易翻越天山，重力作用使风速增大而形成翻山大风，最大风速可达40 $m \cdot s^{-1}$，对农业、林果业、交通运输、人民生活构成严重威胁，破坏力极大，使阿克苏地区成为新疆风灾损失最严重的区域[28]。2019年8月15—18日，阿克苏地区出现了一场罕见的灾害性大风天气过程，近6成站点出现8级以上大风，给农业、林果业造成直接经济损失达9×10^8元。数值模式对此次大风出现漏报，本文使用多种资料对大风成因及漏报原因进行分析，以期为今后分析、预报此类翻山大风提供经验。

1 资料来源

利用高空及地面的常规观测气象资料、阿克苏探空站的探空观测资料、欧洲中心粗网格（空间分辨率为0.5×0.5，时间分辨率为24 h）、细网格（空间分辨率为0.125×0.125，时间分辨率为3 h）的模式预报资料和NCEP逐6 h格距1°×1°的再分析资料、阿克苏站和托万克提根洪沟站2个地面自动气象观测站自8月15日08:00至18日14:00的逐时风向风速资料，从动力、热力等条件及下坡风理论对大风成因进行分析。

2 天气实况和环流背景

2.1 大风概况和特点

2019年8月15—18日，西天山南坡出现连续大风天气，喀什、阿克苏地区、巴音郭楞蒙古自治州瞬间极大风力达11~12级，其中阿克苏地区有110个站（共188站）出现8级以上大风，极大风出现在阿克苏市阿依库勒乡托万克提根洪沟，风力达12级（瞬间极大风速35.9 $m \cdot s^{-1}$）。南疆共13站出现扬沙，4站出现沙尘暴。大风天气造成4次旅客列车停运，给阿克苏地区农业、林果业造成重大损失，受灾农作物1999.1 hm^2、林果5.9×10^4 hm^2、蔬菜瓜果2.1 hm^2，损坏大棚161座，杨树500棵，造成直接经济损失达9×10^8元。从托万克提根洪沟站和阿克苏站风速变化时序图可以看出，阿克苏地区有3次明显的风速波动（表1、图1）。以托万克提根洪沟站为例，15日20:00至16日03:00为第一波，8级以上大风维持了8 h，极大风速35.9 $m \cdot s^{-1}$（12级）。16日03:00之后的5 h风力维持在6~7级，16日09:00至14:00为第二波，8级以上大风维持了6 h，极大风速22.6 $m \cdot s^{-1}$（9级）。16日14:00以后风力再次减弱，之后的16 h风力维持在4~7级，17日07:00至22:00为第三波，8级以上大风维持了16 h，极大风速29.8 $m \cdot s^{-1}$（11级），17日22:00以后才开始减弱。第三波大风维持时间最长，且连续6 h极大风力维持在10~11级。阿克苏站的风力比托万克提根洪沟站弱一些，但是变化趋势基本一致。纵观整个过程，以托万克提根洪沟站为例，15日19:00的极大风速仅为4.9 $m \cdot s^{-1}$，10 min平均风速为0，而20:00突然起风且极大风速达到了过程最大值35.9 $m \cdot s^{-1}$，10 min平均风速为22.2 $m \cdot s^{-1}$；15日20:00起风到18日14:00风速降到8.7 $m \cdot s^{-1}$（5级），前后66 h的过程中，出现了3次明显的风速波动，8级以上大风累计维持了30 h。而3次波动之间，风力小于8级的时候，也基本都在5级以上，极个别时段降到了4级。由此可见，此次大风天气过程具有突发性强、风速峰值与峰谷差值大、大风范围广、风力强、持续时间长、大风期间风速波动明显

表1 三波大风极大风速实况数据

Tab. 1 Real-time wind speed data of three gales

/m·s⁻¹

站点	第一波大风								第二波大风					
	15日				16日				16日					
	20:00	21:00	22:00	23:00	00:00	01:00	02:00	03:00	09:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00
托万克提根洪沟站	35.9	24.0	18.9	20.7	22.5	20.0	21.4	17.7	20.6	20.8	22.6	20.5	21.4	17.5
阿克苏站	22.2	17.4	9.5	16.6	15.3	11.9	12.8	6.2	16.3	13.4	15.3	16.0	13.0	9.8

站点	第三波大风															
	17日															
	07:00	08:00	09:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00	21:00	22:00
托万克提根洪沟站	22.3	20.6	19.9	19.0	21.0	20.5	22.9	27.3	28.4	29.8	28.9	26.7	24.5	21.1	19.9	19.0
阿克苏站	16.1	14.1	14.6	13.7	13.5	16.1	17.3	20.7	21.5	22.6	21.1	19.3	16.7	14.0	12.9	11.4

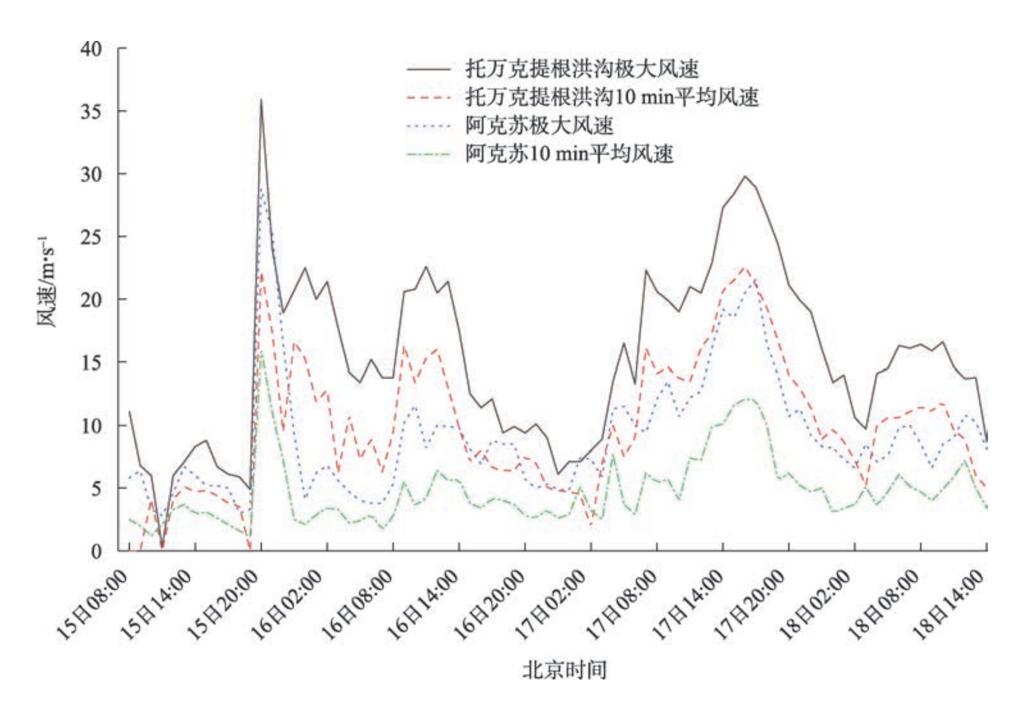


图1 2019年8月15—18日两站风速变化

Fig. 1 Changes of wind speed at two stations from August 15 to 18, 2019

的特征。而此次强风天气主要集中在背风坡侧及山脚局地一带，大风强度明显大于山前地面风速，是一次明显的气流过山引起的强下坡风暴(附阿克苏周边站点及地形图见图2)。

2.2 环流形势演变

2.2.1 高空斜压槽和强锋区 本次大风过程属于脊(阻高)衰退类大风[29]。在2019年8月13日08:00(北京时间，下同)500 hPa高空图(图略)上，欧亚中高纬度为两槽两脊的经向环流，东欧阻塞高压脊发展加强，脊后乌拉尔低涡位置偏南，低涡中心位于50°N处，-16 ℃的冷中心落后于556 dagpm高度中心，等温线与等高线交角几乎垂直，大气斜压性很强。此时新疆受暖高压脊控制，天气晴好，温度较高。15日08:00，欧洲高压脊进一步发展加强，脊顶东伸到乌拉尔山，脊前北风带加强，最大风速达28 m·s⁻¹，低涡东南移到巴尔喀什湖以西，中心逆转，锋区上分裂一个短波沿低涡外围快速东南移到低涡底部，形成不稳定小槽，同时温度槽移速较快，15日08:00已领先于高度槽。受新疆脊阻挡，低涡在48 h仅东移了不到10个经度，能量得以积聚。15日20:00(图3a)，泰米尔半岛处极涡南压，挤压欧洲脊，脊顶部分正变高南落，推动低涡底部的不稳定

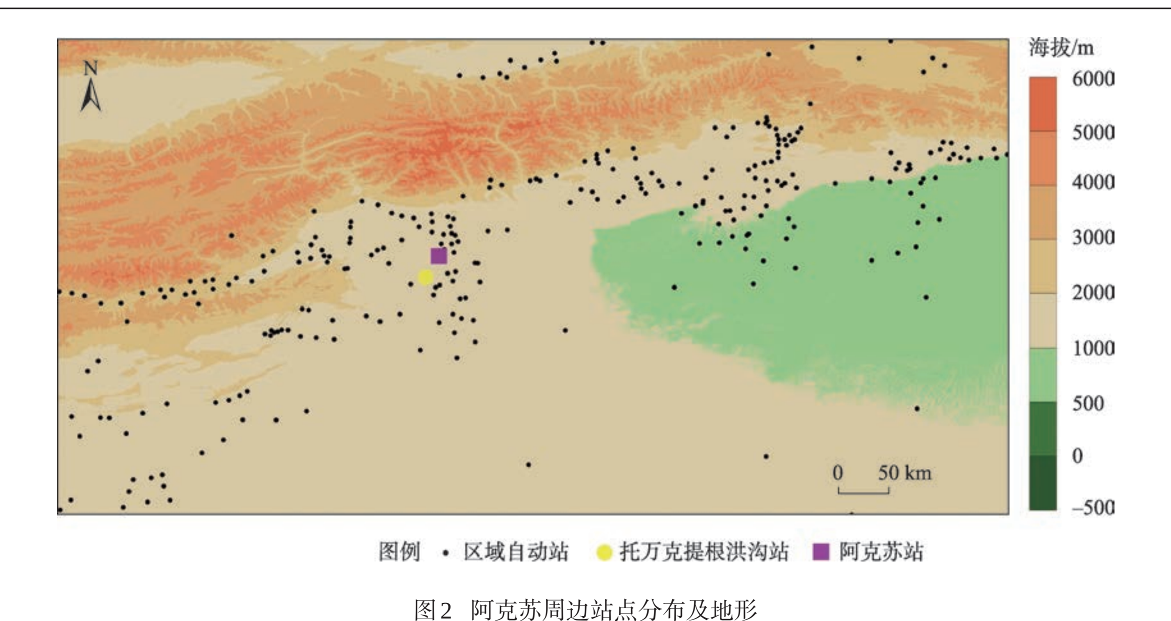


图2　阿克苏周边站点分布及地形

Fig. 2　Distribution of stations around Aksu Prefecture and topography

小槽东移进入南疆，引导地面冷空气翻越西天山进入阿克苏、喀什等地，形成下坡风。同时地面冷锋触发阿克苏地区对流发展，地面出现短时雷暴大风，阿克苏上空500 hPa风速也明显增大，系统性翻山大风和对流性雷暴大风叠加导致地面风速急剧增大，此时正是托万克提根洪沟突然起风并出现过程最大风速的时间。16日08:00(图3b)，欧洲脊继续发展东扩，推动低涡略向东南移，槽前西南风明显增大，低涡底部分裂第2个短波快速东移开始进入新疆，同时引导另一股冷空气翻越西天山进入南疆，16日09:00第二波大风开始，持续到16日14:00。16日20:00，低涡分裂成两部分，北段快速东移北收，南段滞留在中亚地区。17日08:00(图3c)，低涡南段再次分裂，主体东移进入南疆缓慢东移，底部部分冷空气则滞留在中亚，并于18日白天减弱东南移到昆仑山上空。由于低涡主体进入南疆后移速较慢，持续的引导地面冷空气源源不断的翻越西天山，所以第三波地面灾害性大风维持时间长达16 h，10级以上大风维持时间长达6 h，且风速出现了过程的次高值。18日午后，风力降到5级以下，本次大风过程彻底结束。在整个过程中，中低层风向与地面风向不同，且低层风速并未随着中层风速而增大，因而这次大风过程中，动量下传不明显。

2.2.2　地面冷锋　过程前的8月13日，冷高压形成于欧洲，之后缓慢东南移动。14日20:00，冷高压中心移到里海，强度为1022.5 hPa，高压前端伸到巴尔喀什湖南部，此时南疆受热低压控制，低压中心位于南疆盆地东南部，强度为992.5 hPa。15日08:00，冷高压中心位置基本没有变化，高压前端在巴尔喀什湖南部形成了一个小中心，强度为1012.5 hPa。15日白天，地面冷锋进入阿克苏地区，气压梯度逐渐增大。15日20:00(图4a)，气压梯度达到5个纬距内9条等压线，高低压中心压差达到20 hPa，托万克提根洪沟的瞬间极大风速从4.9 $m\cdot s^{-1}$(3级)骤然增大到35.9 $m\cdot s^{-1}$(12级)。16日08:00(图4b)，冷高压位于巴尔喀什湖南部的小中心消失，但是冷锋依然位于西天山，南疆盆地内的热低压没有发生大的变化。16日11:00开始，冷高前端开始西退，盆地内的热低压中心减弱为997 hPa，地面风速也有所减弱，14:00第二波大风结束。16日17:00开始，冷高压前端再次东伸到巴尔喀什湖以南，热低压中心加强为990 hPa，气压梯度达到5个纬距内10条等压线，高低压中心压差达27.5 hPa，但是从16日15:00至17日06:00，托万克提根洪沟的风速维持在5级左右，而没有随着高低压中心压差的增大而增大。17日08:00(图4c)以后，冷高压基本没有变化，热低压则逐渐减弱并东移出我区，冷锋继续维持在西天山，而此时托万克提根洪沟出现了第三波大风。以上变化说明，本次大风主要是高空槽分裂东移的过程中，先后3次引导地面冷空气翻越西天山后势能转化为动能而形成，3次起风时间恰好都是高空短波槽进入西天山的时间。

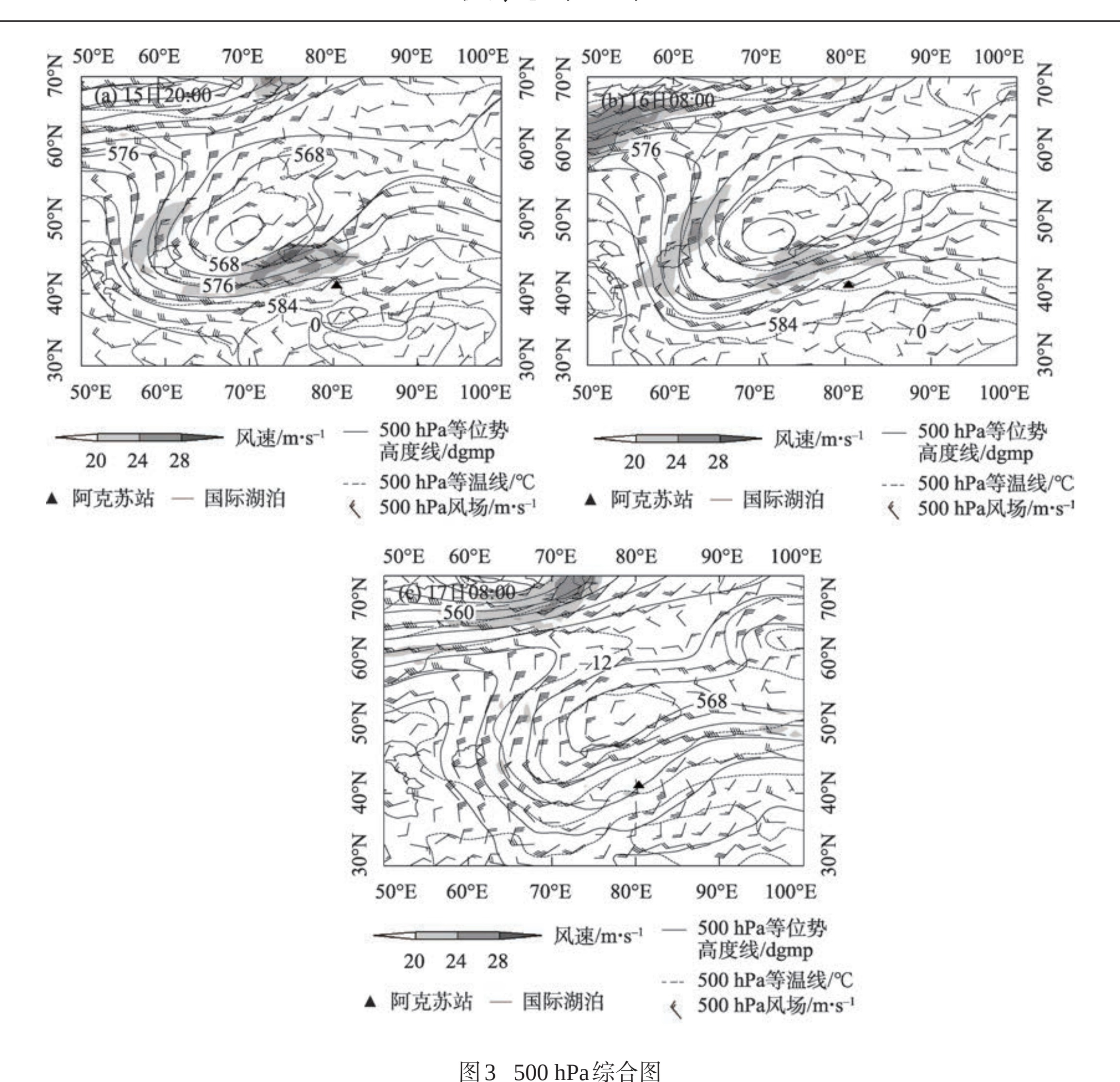


图3　500 hPa综合图

Fig. 3　500 hPa comprehensive map

3　大风过程的动力和热力诊断分析

3.1　*T*-ln*P* 图分析

从8月15日阿克苏探空站的温度对数压力图(图5)上来看，08:00阿克苏上空对流抑制能量达829 J·kg^{-1}，有利于能量的积累。对流有效位能(Convective available potential energy，CAPE)较弱，仅为7.3 J·kg^{-1}，而下沉对流有效位能(Down convective available potential energy，DCAPE)达1110 J·kg^{-1}，低层较干，中层较湿，存在一定的垂直风切变。这种形势有利于对流的触发和雷暴大风的形成。15日20:00对流抑制能量降为零，对流有效位能增大到221 J·kg^{-1}，下沉对流有效位能则急剧增大到1726 J·kg^{-1}，而15日20:00也是突然出现12级大风的时间，21:00风力就降到了9级，随后的7 h，风力始终是8~9级。下沉对流有效位能的急剧增加伴随着突然出现短时12级大风，说明15日20:00地面冷锋触发了对流，出现了短时雷暴大风，同时高空槽引导地面冷空气翻越天山，势能向动能转化，而很强的下沉对流有效位能有利于翻山气流快速下沉形成下坡风暴，翻山风和雷暴大风叠加而产生了短时的12级灾害性大风。短时雷暴大风结束后，高空短波槽引导的地面冷空气继续翻过天山形成下坡风，8级以上大风继续维持了7 h。

3.2　温度平流分析

根据位势倾向方程和ω方程，暖平流区有等压面升高，产生上升运动，低层减压，在冷平流区，等压面降低产生下沉运动，导致地面加压。不同区域冷暖平流不同，地面气压的改变导致气压梯度的改变，有利于形成大风。温度平流越强，越有利于大

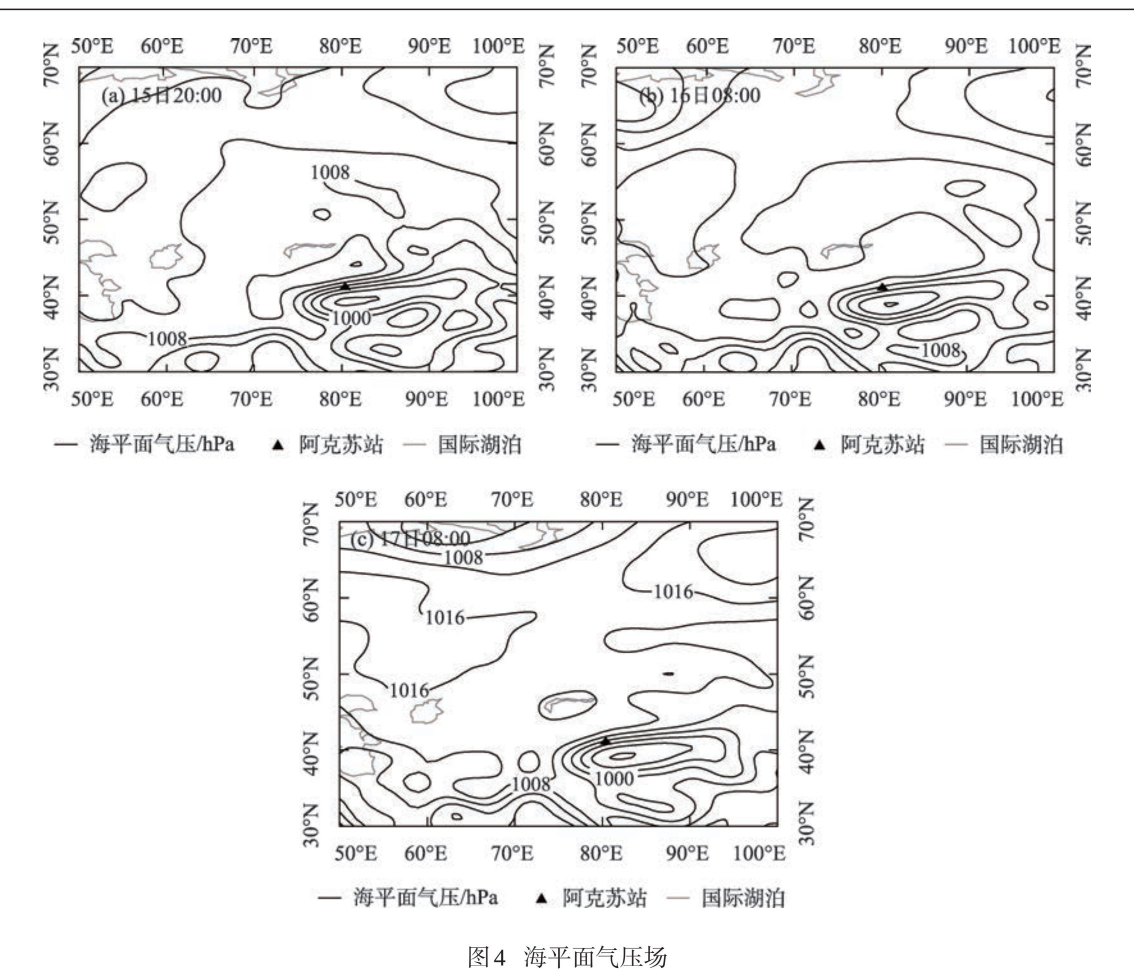
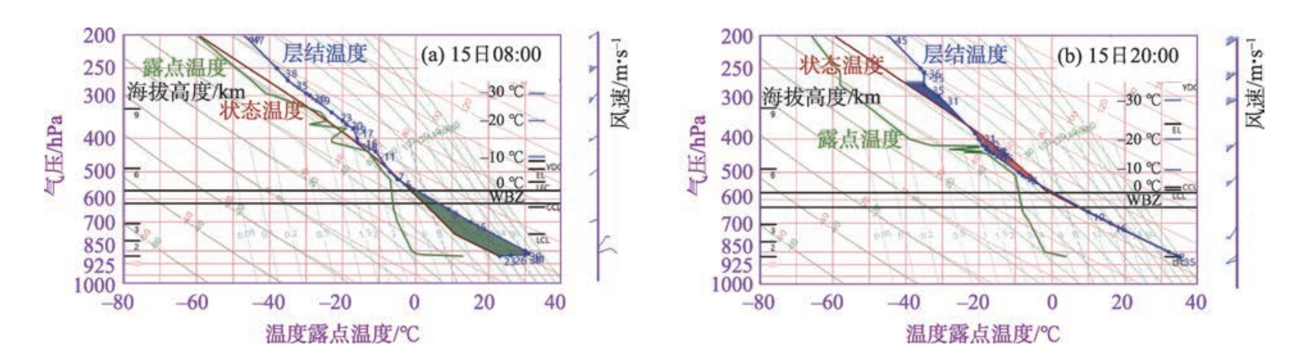


图4　海平面气压场

Fig. 4　Sea level presure field



注：WBZ为湿球0度层；LCL为抬升凝结高度层；CCL为对流凝结高度层；LFC为自由对流高度层；EL为平衡高度层；YDC为理论云顶高度层。

图5　2019年8月15日阿克苏探空站*T*-ln*P*图

Fig. 5　*T*-ln*P* diagrams on 15 August 2019 at Aksu Sounding Station

风的产生。从图5的垂直风场变化情况来看，15日08:00，阿克苏上空低层到中层风向随高度增加而顺时针旋转，表明中低层存在明显的暖平流；而15日20:00，低层风场逆时针旋转，中层顺时针旋转，表明低层转为冷平流，中层依然是暖平流。阿克苏上空温度平流的高度时间剖面图（图6a）显示的更为清楚。在整个过程当中，阿克苏上空低层始终存在一个强冷平流中心，15日夜间强度为-40×10^{-4} K·s^{-1}，16日白天冷平流减弱，16日夜间再次出现强度为-40×10^{-4} K·s^{-1}的中心，17日白天冷平流中心强度达-100×10^{-4} K·s^{-1}。冷平流中心最强的时段恰好是地面灾害性大风维持的时段。持续的冷平流一方面说明大气斜压性强，在力管作用下，冷空气趋于下沉，暖空气趋于上升，大气的势能转化为动能，下

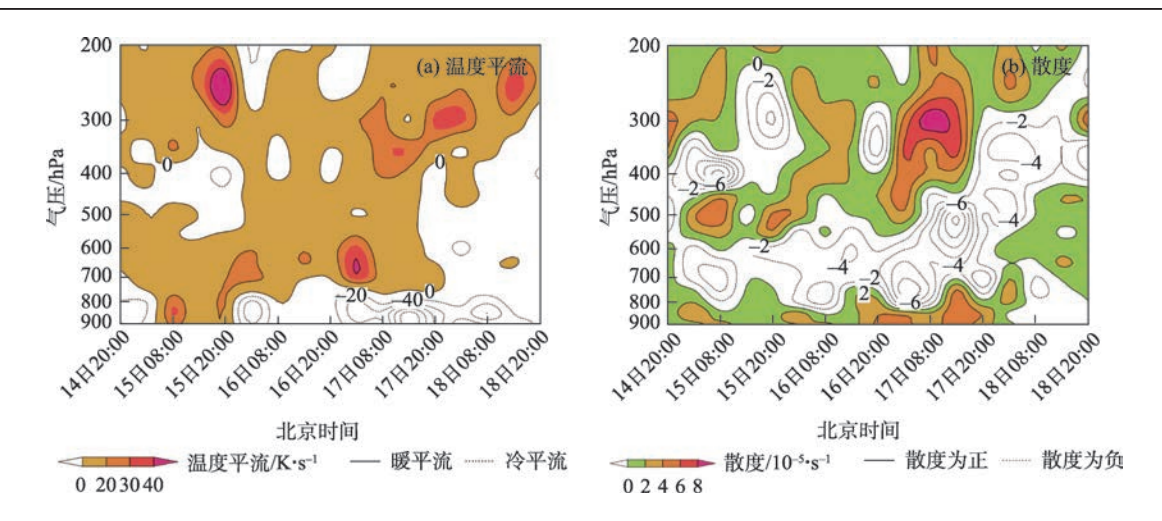


图6 阿克苏上空的高度时间剖面

Fig. 6 Altitude time profile over Aksu Prefecture

沉运动有利于大风产生[30];另一方面,冷空气可以使地面变压加大,变压风也会加强地面的风速[31]。

3.3 高空急流和散度场分析

高空急流入口区易引发次级环流,其右侧(南部)辐散,下部产生上升运动,上升气流使锋前低压加强,其左侧(北部)辐合,下部产生下沉运动,下沉气流有利于锋后高压加强,冷锋前后气压梯度加强,近地层风速加大。从200 hPa的风速分布可以看出(图略),15日08:00,高空急流轴位于西天山上空,急流轴中心最大风速达60 m·s^{-1},急流轴呈西南—东北向,阿克苏地区位于高空急流轴南侧,向南的非地转风偏差分量使该上空有较强的高空辐散。由阿克苏上空散度的高度时间剖面图(图6b)上可以看到,过程前后200 hPa高空始终是较明显的辐散,15日08:00在阿克苏上空200 hPa有散度为3×10^{-5}·s^{-1}的辐散区。17日08:00,高空急流轴中心最大风速达64 m·s^{-1},此时阿克苏上空300 hPa有散度为10×10^{-5}·s^{-1}的辐散区,表明高空急流附近有较强的辐散。与此同时,700 hPa始终是辐合区,散度为−4×10^{-5}·s^{-1},16日夜间散度达−8×10^{-5}·s^{-1},17日白天最强辐合区在500 hPa,散度达−10×10^{-5}·s^{-1},而850 hPa以下一直为较强的辐散区,17日白天辐散最强,最大散度为8×10^{-5}·s^{-1}。结合8月17日14:00阿克苏上空垂直速度W沿41°N的纬向剖面图可以看出,300 hPa以下垂直运动非常强,因此认为,高空急流引起高层、近地层辐散和中低层辐合,说明垂直运动和次级环流非常强,低层气流辐合下沉有利于大风的维持。

3.4 垂直速度分析

从阿克苏上空垂直速度ω的高度时间剖面图(图7a)上可以看到,过程前后,阿克苏上空800 hPa以下始终有较明显的下沉气流,15日夜间下沉运动范围向上伸展到750 hPa附近,中心强度达1.5 Pa·s^{-1};17日白天下沉运动范围进一步向上伸展到500 hPa,中心强度达3 Pa·s^{-1},下沉运动最强的区域在近地层850 hPa附近。同时从图7a也可以看到,本次过程中,前2次风速波动时,垂直下沉运动位于800 hPa以下,800 hPa以上为上升运动;第3次风速波动,虽然下沉运动范围向上伸展到了500 hPa,且下沉运动明显加强,但是500 hPa以上依然为上升运动,这也再次说明本次过程中没有明显的动量从高层下传到低层。从阿克苏上空垂直速度W的纬向剖面及地形叠加图(图7b~d)可知,15日20:00(图7b),阿克苏以西区域整层均为较强上升气流,以东在600 hPa以下为较强下沉气流,阿克苏刚好位于上升气流与下沉气流的中间位置,而这也有利于触发阿克苏的强对流天气。20:00随着翻山风与雷暴大风突然出现,82°E以西区域600 hPa以下均变成了下沉气流,下沉中心位于阿克苏上空800 hPa附近;16日08:00(图7c),500 hPa以下均为弱上升气流,09:00出现第二波大风以后,阿克苏上空依然是弱上升气流,这是由于引起第二波大风的短波槽较弱,引导的冷空气沿天山南坡下来以后,在阿克苏本地上空引起弱的上升运动,因此第二波大风时间相对较短,强度也相对较弱;16日夜间(图略),300 hPa以下均为上升气流,最强上升气流位于阿克苏偏东上空500~

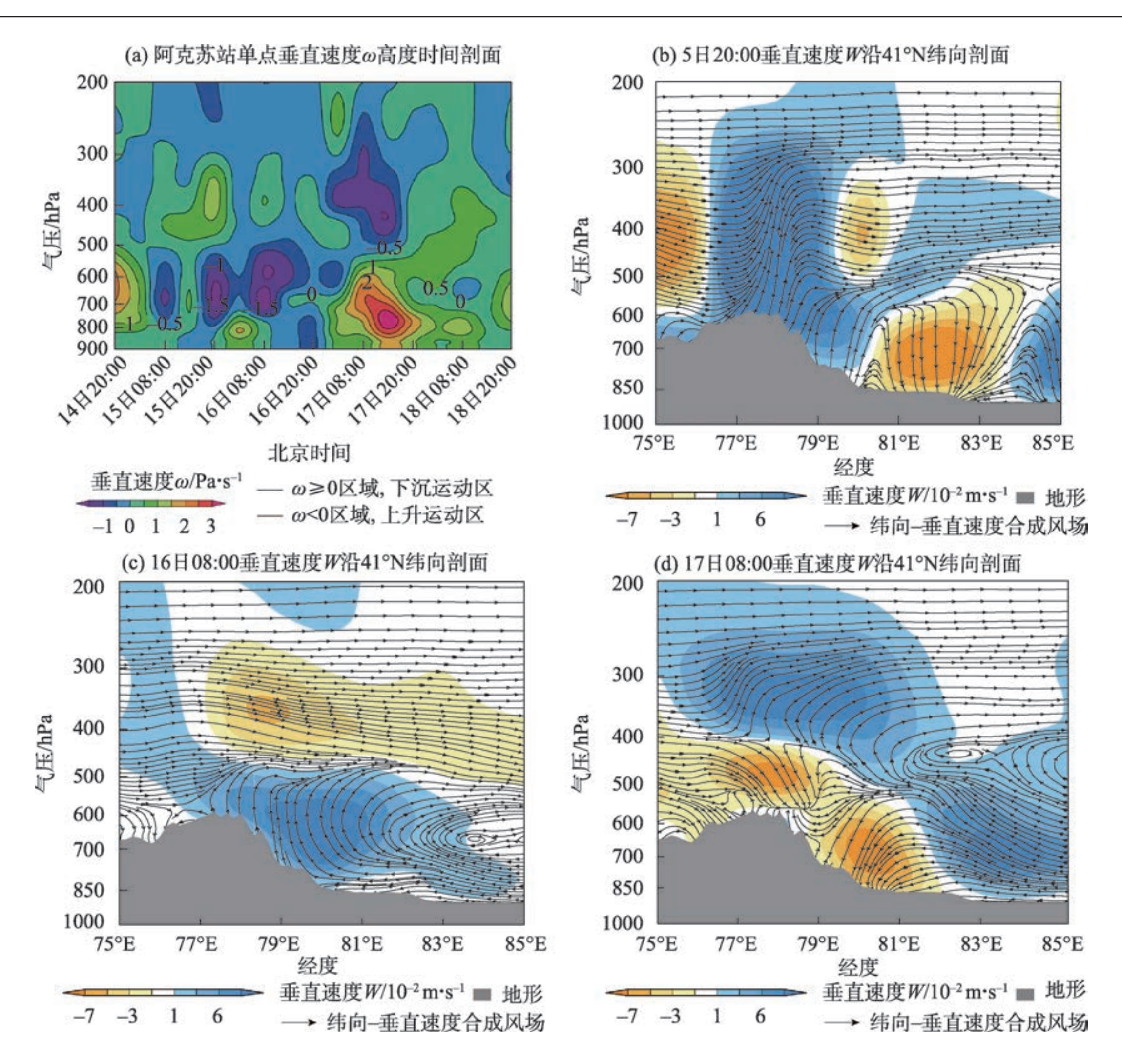


图7 阿克苏上空垂直速度的高度时间剖面和沿41°N的纬向剖面

Fig. 7 Altitude time profile of vertical velocity over Aksu Prefecture and latitudinal profile along 41°N

850 hPa，中心强度达7×10^{-2} m·s^{-1}。而随着主槽东移引导大量冷空气翻山，引起第三波大风，17日08:00（图7d），82°E以西区域500 hPa以下均变成强下沉气流，中心位于阿克苏上空700 hPa附近。17日14:00（图略），下沉气流中心下移到800 hPa以下，此时也是出现过程次高值的时间。分析其原因，17日白天阿克苏及以西区域500 hPa以下均为强下沉气流，且当天的下沉气流最强，垂直下沉运动的中心就位于阿克苏上空800 hPa附近，强度达−7×10^{-2} m·s^{-1}，而阿克苏以东区域为较强的上升气流，中心强度达7×10^{-2} m·s^{-1}，而17日恰好主槽过境，从时间推算，14:00槽线恰好位于阿克苏上空（80.21°E，41.17°N），槽前为上升区，槽后为下沉区。这种槽前上升、槽后下沉运动，使大量扰动有效位能转化为扰动动能，形成斜压不稳定，使翻山风在下坡过程中风速增大并长时间维持。因此，第三波大风持续时间长达16 h，且从17日14:00起连续6 h维持10~11级，而第一波大风开始时在雷暴大风的加持下瞬间达到12级，之后维持在8~9级。

4 可预报性分析

本次灾害性大风天气在服务上出现了漏报，究其原因，主要有2个方面。漏报的第一个原因：模式预报误差。用8月14日20:00初始场的ECMWF模式资料与实况图进行了对比分析，结果表明，8月15日20:00模式500 hPa高度预报图中，低涡主体位置、形状、中心强度跟实况图差别不大，但是对分裂短波的走向预报跟实况差别较大，预报图中新疆脊较强，短波是沿脊后西南气流向东北移动扫过西国境线（图8a），随后低涡整体缓慢东移进入新疆。17日槽前西南气流控制了南北疆大部区域（图8b），系

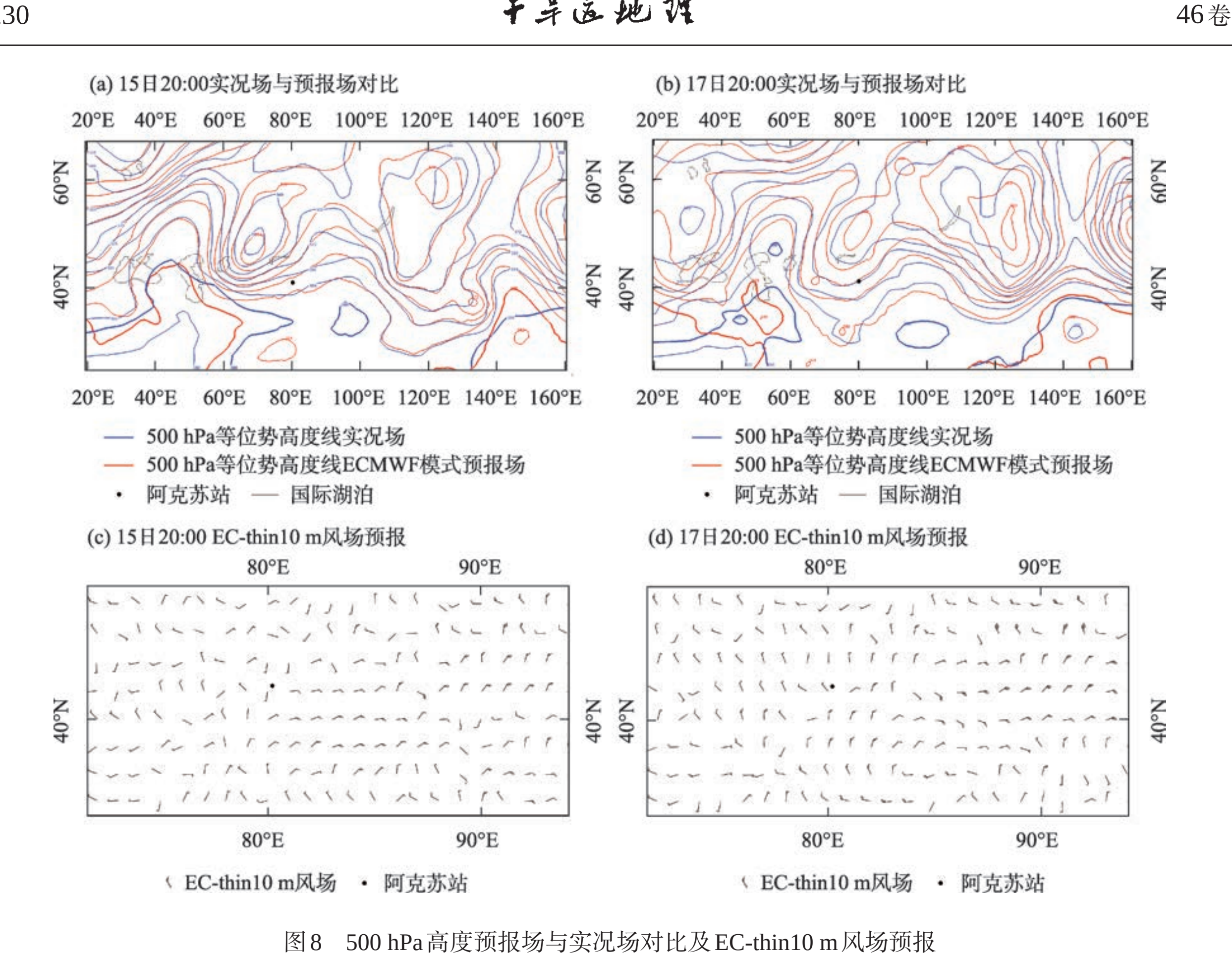


图8 500 hPa高度预报场与实况场对比及EC-thin10 m风场预报

Fig. 8 500 hPa altitude prediction field versus live field and EC-thin10 m wind field forecast

统的这种走势有利于新疆大部自西向东出现降水，而实况图中15日20:00至17日20:00，低涡先后分裂4次，前2次分裂的短波和最后1次分裂后的低槽主体进入了南疆盆地，先后3次引导地面冷空气翻过天山，系统的这种变化则是有利于天山南坡出现翻山大风。而EC-thin（欧洲中心细网格预报模式）的10 m风场（图8c~d）和850 hPa风场（图略）预报中，天山南坡没有预报大风天气，而是预报了弱的冬灌，这也有利于南疆西部的降水。因此，本场大风天气过程出现了漏报。而漏报的第2个原因，则是15日20:00，有短时对流性雷暴大风发生，与翻山风叠加，增大了风力的同时，也增加了预报难度。

5 结 论

（1）本次过程是在阻塞高压发展加强和低涡长时间维持的形势下导致的1次持续性大风过程。高空斜压槽和地面强冷锋长时间维持，随着低槽分3次东移，引导地面冷空气翻越天山，在高空急流和低层冷平流的共同作用下，在天山南坡造成长时间的大风过程，阿克苏出现了3次大风波动天气。

（2）3次大风波动过程具有突发性强、风速峰值与峰谷差值大、大风范围广、风力强、持续时间长、风速波动明显的特征。前2次大风波动是由分裂短波东移引起，短波移速快，故灾害性大风维持时间短，第3次大风波动是由主槽东移引起，移速较慢，故灾害性大风维持时间长，整体风速也很大。

（3）本次大风主要是由于系统深厚的斜压性造成的，冷空气翻越天山后，在重力的作用下，大气的势能转化为动能而成，而受强冷平流影响，大气质心下沉，加速了势能向动能的转化。第1次大风波动有对流性雷暴大风叠加，因此瞬间出现12级的大风。

（4）高空急流的抽吸作用，使其下方形成次级环流的上升支，有利于形成对流运动，促进上下层之间的能量交换。本次过程中强次级环流使中层辐合及低层辐散，有利于大风加强和维持。

参考文献（References）

[1] 吴紫煜, 姚雯, 李超, 等. 京津冀地区中α尺度飑线过程中大风

特征分析及成因初探[J]. 气象与环境科学, 2016, 39(2): 90–98. [Wu Ziyu, Yao Wen, Li Chao, et al. Study on the characteristics and causes of strong wind during the meso-α-scale of squall line process in Beijing-Tianjin-Hebei area[J]. Meteorological and Environmental Sciences, 2016, 39(2): 90–98.]

[2] 王纪军, 竹磊磊, 胡彩虹, 等. 陇海-京广线沿线河南段年最大风速和年最大积雪深度重现期研究[J]. 气象与环境科学, 2016, 39(3): 9–14. [Wang Jijun, Zhu Leilei, Hu Caihong, et al. Return periods of annual maximum wind speed and maximum snow depth along the Lianyungang-Lanzhou railway and Beijing-Guangzhou railway in Henan Province[J]. Meteorological and Environmental Sciences, 2016, 39(3): 9–14.]

[3] 肉孜·阿基, 阿依谢姆古丽·孜比布拉, 艾克代·沙拉木. 2014年冬季阿图什2次灾害性大风对比分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2017, 11(3): 72–78. [Aji Rouzi, Zibibula Ayixiemuguli, Shalamu Akedai. Comparative analysis of two disastrous winds in winter of 2014 in Artux of Xinjiang[J]. Desert and Oasis Meteorology, 2017, 11(3): 72–78.]

[4] 尹尽勇, 曹越男, 赵伟. 2010年4月27日莱州湾大风过程诊断分析[J]. 气象, 2011, 37(7): 897–905. [Yin Jinyong, Cao Yuenan, Zhao Wei. A diagnostic analysis of the gale process in Laizhou gulf on April 27, 2010[J]. Meteorological Monthly, 2011, 37(7): 897–905.]

[5] 梁建宇, 孙建华. 2009年6月一次飑线过程灾害性大风的形成机制[J]. 大气科学, 2012, 36(2): 316–336. [Liang Jianyu, Sun Jianhua. The formation mechanism of damaging surface wind during the squall line in june 2009[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2012, 36(2): 316–336.]

[6] 丁一汇. 高等天气学[M]. 北京: 气象出版社, 2005: 138–149. [Ding Yihui. Advanced synoptic meteorology[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2005: 138–149.]

[7] Augusti G, Borri C, Niemann H J. Is aeolian risk as significant as other environmental risks?[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2001, 74(3): 227–237.

[8] 吴秀兰, 马禹, 陈睿勇. 1980—2019年北疆风灾时空变化特征及成因[J]. 干旱气象, 2021, 39(2): 262–268. [Wu Xiulan, Ma Yu, Chen Ruiyong. Temporal and spatial variation characteristics of wind disaster and its causes in northern Xinjiang from 1980 to 2019[J]. Journal of Arid Meteorology, 2021, 39(2): 262–268.]

[9] 张太西, 王慧, 余行杰. 新疆风灾时空分布特征分析[J]. 干旱区地理, 2021, 44(5): 1281–1289. [Zhang Taixi, Wang Hui, Yu Xingjie. Spatial-temporal distribution of wind disasters in Xinjiang[J]. Arid Land Geography, 2021, 44(5): 1281–1289.]

[10] 孙玉莲, 任余龙, 韦伯龙, 等. 甘肃临夏地区2次沙尘寒潮天气成因对比[J]. 干旱气象, 2013, 31(1): 150–156. [Sun Yulian, Ren Yulong, Wei Bolong, et al. Contrast analysis of two cold wave weather processes with sand dust in the middle region of Gansu Province[J]. Journal of Meteorology, 2013, 31(1): 150–156.]

[11] 程月星, 孙继松, 戴高菊, 等. 2016年北京地区一次雷暴大风的观测研究[J]. 气象, 2018, 44(12): 1529–1541. [Cheng Yuexing, Sun Jisong, Dai Gaoju, et al. Study on a thunderstorm event over Beijing in 2016[J]. Meteorological Monthly, 2018, 44(12): 1529–1541.]

[12] 马鸿青, 张江涛, 李彦, 等. 河北保定"7·9"致灾雷暴大风环境场与风暴特征[J]. 干旱气象, 2019, 37(4): 613–621. [Ma Hongqing, Zhang Jiangtao, Li Yan, et al. Environmental field and storm features of a destructive thunderstorm gale in Baoding of Hebei Province on 9 July 2017[J]. Journal of Arid Meteorology, 2019, 37(4): 613–621.]

[13] 潘新民, 祝学范, 黄智强, 等. 新疆百里风区地形与大风的关系[J]. 气象, 2012, 38(2): 234–237. [Pan Xinmin, Zhu Xuefan, Huang Zhiqiang, et al. The relation between the strong wind region along one hundred kilometer of railway and the topography in Xinjiang[J]. Meteorological Monthly, 2012, 38(2): 234–237.]

[14] 肉孜·阿基, 阿布力米提江·阿不力克木, 李如琦, 等. 乌鲁木齐一次强东南大风天气成因分析[J]. 干旱气象, 2015, 33(3): 474–480. [Aji Rouzi, Ablikim Ablimitjan, Li Ruqi, et al. Synoptic causation analysis of a strong southeast gale over Urumqi on March 30, 2012[J]. Journal of Arid Meteorology, 2015, 33(3): 474–480.]

[15] 汤浩, 王旭, 储长江, 等. 乌鲁木齐城区一次极端东南大风的形成机制——重力波与超低空急流耦合[J]. 干旱区地理, 2019, 42(6): 1229–1238. [Tang Hao, Wang Xu, Chu Changjiang, et al. Formation mechanism of a southeast gale event in Urumqi urban area: The coupling of gravity wave and ultra-low level jet[J]. Arid Land Geography, 2019, 42(6): 1229–1238.]

[16] Scorer R S. Theory of wave in the lee of mountains[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1949, 7(1): 41–56.

[17] Klemp J B, Lilly D K. The dynamics of wave-induced downslope winds[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 1975, 32: 320–339.

[18] Lilly D K. A severe downslope windstorm and aircraft turbulence event induce by a mountain wave[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 1978, 35(1): 59–77.

[19] Doyle J D, Durran D R. The dynamics of mountain-wave-induced rotors[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 2002, 59(2): 186–201.

[20] Doyle J D, Smith R B. Mountain waves over the Hohe Tauern: Influence of upstream diabatic effects[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2003, 129(588): 799–823.

[21] 叶笃正. 小地形对于气流的影响[J]. 气象学报, 1956, 27(3): 241–262. [Ye Duzheng. Topographical effect on the airflow[J]. Acta Meteorologica Sinica, 1956, 27(3): 241–262.]

[22] 桑建国. 下坡运动的分析解[J]. 气象学报, 1989, 47(2): 191–198. [Sang Jianguo. Analytical solutions of downslope motions[J]. Acta Meteorologica Sinica, 1989, 47(2): 191–198.]

[23] 臧增亮, 张铭. 三层模式背风波的理论研究[J]. 气象学报, 2004, 62(4): 395–400. [Zang Zengliang, Zhang Ming. Theoretical study on trapped lee waves on three-layers model[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2004, 62(4): 395–400.]

[24] 卢冰, 史永强, 王光辉, 等. 新疆克拉玛依强下坡风暴的机理研究[J]. 气象学报, 2014, 72(6): 1218−1230. [Lu Bing, Shi Yongqiang, Wang Guanghui, et al. Numerical study of severe downslope winds at Kelamayi, Xinjiang[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2014, 72(6): 1218−1230.]

[25] 汤浩, 陆汉城, 储长江, 等. 天山峡谷穿谷急流触发强下坡风暴的中尺度特征分析[J]. 气象, 2020, 46(11): 1450−1460. [Tang Hao, Lu Hancheng, Chu Changjiang, et al. Mesoscale analysis of severe downslope windstorm caused by gap jet in Tianshan Mountain canyon[J]. Meteorological Monthly, 2020, 46(11): 1450−1460.]

[26] 张俊兰, 张莉. 一次天山翻山大风天气的诊断分析及预报[J]. 沙漠与绿洲气象, 2011, 5(1): 13−17. [Zhang Junlan, Zhang Li. Diagnostic analysis and forecast of a strong windy weather across Tianshan Mountains[J]. Desert and Oasis Meteorology, 2011, 5(1): 13−17.]

[27] 周宏, 杨利鸿, 胡素琴, 等. 2014年南疆西部一次大风天气过程分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2015, 9(5): 50−55. [Zhou Hong, Yang Lihong, Hu Suqin, et al. An analysis on a strong windy weather process over the west of south Xinjiang in 2014[J]. Desert and Oasis Meteorology, 2015, 9(5): 50−55.]

[28] 张学文, 张家宝. 新疆气象手册[M]. 北京: 气象出版社, 2006: 185−189. [Zhang Xuewen, Zhang Jiabao. Xinjiang meteorological manual[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2006: 185−189.]

[29] 张家宝, 苏起元, 孙沈清, 等. 新疆短期天气预报指导手册[M]. 乌鲁木齐: 新疆人民出版社, 1986, 271−318. [Zhang Jiabao, Su Qiyuan, Sun Shenqing, et al. Guide manual of the short term weather forecast in Xinjiang[M]. Urumqi: Xinjiang People Press, 1986: 271−318.]

[30] 吕美仲, 侯志明, 周毅. 动力气象学[M]. 北京: 气象出版社, 2004: 142−143. [Lü Meizhong, Hou Zhiming, Zhou Yi. Dynamics meteorology[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2004: 142−143.]

[31] 朱乾根, 林锦瑞, 寿绍文, 等. 天气学原理和方法[M]. 北京: 气象出版社, 1981: 249. [Zhu Qiangen, Lin Jinrui, Shou Shaowen, et al. The principle and method of weather[M]. Beijing: China Meteorological Press, 1981: 249.]

Fine characteristics and cause analysis of rare gale over Tianshan Mountains over Aksu Prefecture in August, 2019

Rouzi AJI, YU Bixin, LI Ruqi

(Xinjiang Meteorological Observatory, Urumqi 830002, Xinjiang, China)

Abstract: Because of its unique geographic location and landform, Aksu Prefecture, located in the midwest of southern Xinjiang, is prone to gale weather when the surface cold air is forceful. For better knowledge of its mechanism, the fine characteristics and its effect system, and dynamic and thermal conditions of the rare gale over the Tianshan Mountains over Aksu Prefecture from August 15th to 18th, 2019 are assessed, based on conventional and intensive detecting, radiosonde observation, and the National Center for Environmental Prediction reanalysis data. The outcomes are as follows. This gale is known as a persistent gale. The blocking high over Eastern Europe has developed to strengthen against the circulation background, and the Central Asia low vortex has been maintained for a long time, with three short waves split and moving east. It is caused by movement energy converted from cold air potential energy when the upper-level jet stream and low-level cold advection work perfectly together. There are three gale waves, all of which are caused by cold air being guided over the Tianshan Mountains by the upper trough. The gale lasted only a few minutes for the first two times, triggered by a short-wave trough. The gale last time lasted for a long time, triggered by the main trough moving east. For the first time, the gale wave was composed of convective thunderstorm winds with instantaneous wind speeds reaching the grade 12. It benefits the strengthening and preservation of the strong vertical motion and secondary circulation caused by the high-level jet, middle-level convergence, and low-level divergence.

Key words: cross over mountain gale; thunderstorm wind; dynamic conditions; thermal conditions; Aksu Prefecture